

# 无线多媒体传感器网络混合虚拟势场覆盖研究\*

王晓晨<sup>1</sup>, 冯秀芳<sup>1</sup>, 冯晓媛<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(太原理工大学 计算机科学与技术系, 山西 太原 030000)

<sup>2</sup>(太原大学 外语师范学院 现代信息技术系, 山西 太原 030012)

通讯作者: 冯秀芳, E-mail: feng\_xf2008@126.com

**摘要:** 主要研究无线多媒体传感器网络的模型优化和区域覆盖增强问题. 首先从多媒体传感器节点具有方向性的感知特性出发, 针对视频可接受清晰度问题, 设计了一种改进的扇环感知模型, 并以此为基础对无线多媒体传感器网络(WMSN)中区域覆盖增强问题进行研究. 其次, 采用混合虚拟势场对 WMSN 的区域覆盖进行增强, 质心在虚拟势场产生的引力和斥力作用下运动. 算法针对传统虚拟势场可能出现因局部极小而导致覆盖优化效果降低的问题改进了斥力函数, 引入邻居节点共同覆盖率辅助节点感知方向的调整. 并在传感器节点迭代完成后引入边界斥力, 以进一步优化边界节点的利用率. 最后通过一系列的模拟仿真实验和效率对比表明了算法的有效性.

**关键词:** 无线多媒体传感器网络; 覆盖增强; 区域覆盖; 改进感知模型; 混合虚拟势场; 共同覆盖率

中文引用格式: 王晓晨, 冯秀芳, 冯晓媛. 无线多媒体传感器网络混合虚拟势场覆盖研究. 软件学报, 2013, 24(Suppl. (1)): 1-6. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13001.htm>

英文引用格式: Wang XC, Feng XF, Feng XY. Study of mixed virtual potential field coverage algorithm in WMSN. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013, 24(Suppl. (1)): 1-6 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13001.htm>

## Study of Mixed Virtual Potential Field Coverage Algorithm in WMSN

WANG Xiao-Chen<sup>1</sup>, FENG Xiu-Fang<sup>1</sup>, FENG Xiao-Yuan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Department of Computer Science and Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030000, China)

<sup>2</sup>(Department of Modern Information Technology, Foreign Language Normal College, Taiyuan University, Taiyuan 030012, China)

Corresponding author: FENG Xiu-Fang, E-mail: feng\_xf2008@126.com

**Abstract:** This paper studies the optimization model and area coverage enhancement issues in wireless multimedia sensor networks (WMSNs). First, based on the directional perception characteristics of the multimedia sensor nodes, a modified sector-ring sensing model is provided to explore issues in video acceptable sharpness and regional coverage enhancement in WMSNs. Next, a mixed virtual potential field is proposed to enhance the area coverage in WMSNs through centroids movement under the effect of gravity and repulsion from the virtual potential field. To overcome the deficiency of local minimum and its reduced optimizing effect of coverage with traditional virtual potential field, the proposed algorithm improves the function of repulsion force by taking the common coverage rate of neighbor nodes into consideration to assist the adjustment of perception directions of the nodes. It also transmits border-dynamic repulsion force to sensor nodes after the iteration is completed to further optimize utilization of boundary nodes. Finally, a series of experiments and related simulations are performed to demonstrate the effectiveness of the algorithm.

**Key words:** WMSN; coverage enhancement; area coverage; modified sensing model; mixed virtual potential field; common coverage rate

部署和覆盖是传感器网络中的基本问题, 反映了网络对物理世界感知范围和质量. 近几年来, 国内外学者相

\* 基金项目: 山西省回国留学人员科研资助项目(2011-029); 山西省留学人员科技活动项目择优资助; 山西省科技基础条件平台建设项目(20110910003-0103)

收稿时间: 2013-05-02; 定稿时间: 2013-08-22

继对无线传感器网络的覆盖问题进行了研究,并取得了一定的成果,但大都针对传统无线传感器网络的全向感知模型.随着获取更加全面丰富感知信息的需求,能够采集图像、声音、视频等多媒体信息的无线多媒体传感器网络(wireless multimedia sensor network,简称 WMSN)应运而生.新型的无线多媒体传感器几乎都带有视频传感器<sup>[1]</sup>.不同于传统传感器的全向感知模型,视频传感器采用有向感知模型.由于感知模型上的差异,使得原有的覆盖成果不能直接应用于有向传感器网络,所以急需有新的方案产生.

对于 WMSN 的覆盖问题,Topcuoglu 等人在文献[2]中对 3D 有向传感器网络覆盖的完整性和连通性问题进行了讨论.陶丹等人在文献[3]中提出了改进的方向可调感知模型,同时提出了基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法.该算法通过质心点在虚拟力作用下作扩散运动,以消除网络中感知重叠区和盲区来增强整个网络的覆盖.赵靖<sup>[4]</sup>等人也提出采用虚拟向心力和网格理论对 WMSN 进行覆盖优化,并关闭冗余的多媒体传感器以降低能耗.肖甫等人<sup>[5]</sup>针对传统虚拟力中存在局部最小点问题,提出了基于改进势场的有向传感器网络路径覆盖增强算法,达到对路径的高效覆盖.

本文针对只有当视频传感器上的摄像机在焦距范围内时,接受到的图像的清晰度才可以被接受的问题,提出了扇环感知模型.并在此基础上对 WMSN 覆盖增强问题进行分析与研究,通过基于改进虚拟势场和边界斥力的混合虚拟势场的方式实现对 WMSN 高效的区域覆盖.

## 1 有向感知模型

在 WMSN 中,由于传感器节点具有方向性和视角,提出了有向感知模型(directional sensing model),即扇形模型,用来反映多媒体传感器节点的感知区域.事实上,对 WMSN 中占有重要地位的视频传感器来说,只有当传感器上的摄像机在焦距范围内时,接受到图像的清晰度才可以被接受,也就是说,视频传感器在某一工作方向上的有效感知范围是一个扇环.通过一个实例解释改进模型的原理<sup>[1]</sup>.

如果要计算一个 CMUCam3 视频传感器的感知半径,参数焦距  $f$ ,焦距距离  $s$ ,焦距比  $N$  和散光圈  $c$  分别为 50mm,50m,2.8mm 和 0.011mm,计算其超焦距,即 WMSN 中的感知半径.若以扇形计算,得到感知半径是 132m.而实际 CMUCam 的视野是在 31m~132m 之间的(如图 1 所示).实际上,方向传感器网络通过 3D 感知模型来定义更加准确和接近实际应用<sup>[6]</sup>,但是,由于 3D 模型在设计和分析上的复杂性,大部分相关工作集中在 2D 感知模型上.

**定理 1.** 感知模型采用五元组  $(p, \vec{d}_{ij}, \alpha, r_n, r_f)$  表示(如图 2 所示),其中  $p$  为传感器节点的当前位置,  $\vec{d}_{ij}$  记录多媒体传感器方向的单位向量,  $2\alpha$  描述有向传感器的最大感应视角(即 FoV),  $r_n$  为传感器清晰度可被接受最近感知半径,  $r_f$  为传感器清晰度可被接受最远感知半径.在节点工作时,感知区域是一个扇环.特别的,当  $\alpha = \pi$  时,感知区域对应全向感知模型是一个圆环.

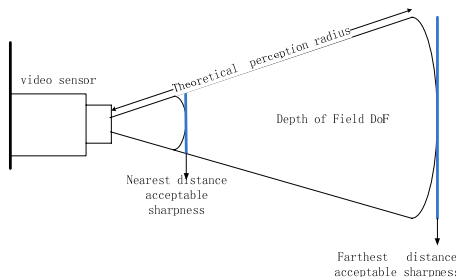


图 1 CMUCam3 感知范围示例

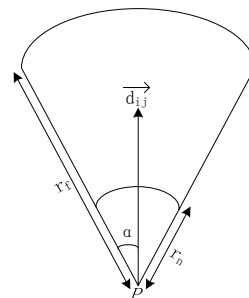


图 2 改进有向感知模型

一个用来判断点  $t$  能否被传感器  $p$  覆盖的简单方法:如果  $r_n \leq \|p, t\| \leq r_f$ , 并且满足  $\vec{pt} \cdot \vec{d}_{ij} \geq \|\vec{pt}\| \cos \alpha$  时,点  $t$  被覆盖.当且仅当区域  $A$  中的任意点都被传感器  $p$  覆盖时  $A$  被  $p$  覆盖<sup>[7]</sup>.

除特别说明,下文中出现的无线多媒体传感器节点和有向传感器节点均满足定理 1 中的无线多媒体传感

器有向感知模型.本文中的无线多媒体传感器网络覆盖增强研究均基于该改进模型进行研究.

## 2 有向感知模型

虚拟势场最早被应用在机器人的运动中<sup>[3]</sup>,把势场源分为目标地的吸引力和障碍物的排斥力.但采用虚拟势场时可能在引力和斥力的同时作用下使机器人受到合力为零而无法达到目的地.在将虚拟势场应用于传感器网络的覆盖中时,同样存在该问题,即在未优化完成时节点受到的合力已经为 0,陷入局部极小点,导致覆盖优化达不到预期效果.针对该问题将邻居节点的共同覆盖面积引入来改进斥力函数,打破平衡.对于边界节点利用率低的现象,通过边界斥力调整边界节点的感知方向以达到提高覆盖率的目的.

### 2.1 改进虚拟势场

在 WMSN 的区域覆盖增强中,传感器节点  $S_i$  的引力函数一般定义为公式(1),其中  $P_i, P_j$  分别是传感器节点  $S_i, S_j$  的坐标,  $K_G$  为引力常数,  $G_{ij}$  为引力,  $D_{th}$  用于控制节点密度,可以根据计划的节点密度进行计算,本文中取常规值  $\sqrt{3}R$ ,  $C_{th}$  为节点间通信距离,节点间距离超出通信距离,作用力为 0,  $\alpha_{ij}$  为传感器节点间的方位角,用来调整传感器节点的感知方向.传感器节点间距离在密度控制阈值与通信距离之间时,受引力作用,方向为  $S_i$  节点的质心指向  $S_j$  质心.

$$G_{ij} = \begin{cases} \left( K_G (P_i - P_j)^2, \alpha_{ij} \right), & D_{th} \leq \|P_i - P_j\| \leq C_{th} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$R_{ij} = \begin{cases} \left( \frac{K_R}{(P_i - P_j)^2}, \alpha_{ij} + \pi \right), & \|P_i - P_j\| \leq C_{th} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

在势场中,传感器节点间的距离若小于  $C_{th}$ ,则存在斥力作用.距离越近斥力越大,反之越小.距离大于  $C_{th}$  时,斥力函数值为 0.斥力用来保证邻居节点间的距离处于最优值<sup>[8]</sup>,以达到增强覆盖的目的.传感器节点  $S_i$  的斥力函数通常为公式(2),其中,  $K_R$  为斥力常数,  $R_{ij}$  为斥力.

针对传感器节点在覆盖优化过程中达到的引力和斥力合力为 0 而导致局部极小的问题,在原本的斥力函数引入邻居节点之间的共同覆盖率,打破局部极小受力平衡状态,以达到更好的覆盖效果.若传感器节点  $S_i$  覆盖的区域面积为  $A_i, S_j$  覆盖的区域面积为  $A_j$ ,则  $S_i$  相对  $S_j$  的共同覆盖率  $A_{ij}$  可以表示为

$$A_{ij} = (A_i \cap A_j) / A \quad (3)$$

这样,改进的传感器节点  $S_i, S_j$  之间的斥力函数定义为

$$R_{ij} = \begin{cases} \left( \frac{K_R (1 + O_{ij})}{(P_i - P_j)^2}, \alpha_{ij} + \pi \right), & \|P_i - P_j\| \leq C_{th} \text{ and } A_{ij} > A_0 \\ \left( \frac{K_R}{(P_i - P_j)^2}, \alpha_{ij} + \pi \right), & \|P_i - P_j\| \leq C_{th} \text{ and } A_{ij} \leq A_0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其中,  $A_0$  是共同覆盖率的阈值,  $O_{ij}$  是与  $A_{ij}$  相关的斥力因子,本文中定义为公式(5),这样就可以得出传感器节点  $S_i$  的合力(公式 6).

$$O_{ij} = \tan(A_{ij}\pi/2) \quad (5)$$

$$F_i = \sum G_{ij} + \sum R_{ij} \quad (6)$$

与文献[5]类似,传感器节点的受力点为感知区域的质心.当合力  $F_i$  大于阈值  $F_0$  时,传感器进行移动,方向由合力的方向决定.

## 2.2 边界斥力

在使用改进虚拟势场对覆盖优化完成后,为了增强边界节点的覆盖率,加入边界斥力的作用<sup>[8]</sup>.边界斥力基于胡克定律进行定义.在首次优化完成后,传感器节点  $S_i$  确定自身的位置,并计算自身沿感知方向  $\overline{d_{ij}}$  与边界的距离,若到任意边界的距离  $d_i$  小于节点到质心的距离,则继续进行调整.根据胡克定律,边界斥力为

$$F_b = \begin{cases} -K_b(d_i - d_c), & 0 \leq d_i < d_c \\ 0, & d_i \geq d_c \text{ or } d_i < 0 \end{cases}$$

其中  $d_c$  表示传感器节点到质心的距离,根据全向感知模型节点间的最优距离<sup>[8]</sup>可以得出  $d_c$  为有向感知模型节点间的最优距离, $d_i$  小于最优距离时对其使用边界斥力进行优化,若  $d_i$  大于最优距离或  $d_i < 0$  即节点在区域外部,则不受边界力的作用.

## 3 实验结果

### 3.1 覆盖效果

本文实验采用 Matlab7.0 进行模拟仿真,在  $1000\text{m} \times 1000\text{m}$  的检测区域内随机部署 100 个有向传感器节点,感知半径为 60m.对比在改进扇环模型下采用混合虚拟势场和传统虚拟势场调整网络部署的覆盖效果.图 3 为随机部署 100 个节点的初始覆盖效果图,可以明显看出重叠区域和空白区域比较多,没有实现最大化覆盖.

图 4 为采用传统虚拟势场对初始覆盖进行优化后,传感器节点对监测区域的覆盖情况,可以看出,使用传统虚拟势场迭代 100 次后,监测区域内节点分布比较均匀,但依然存在一些空白和重叠的监测区域.

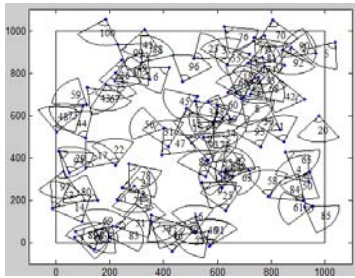


图 3 随机部署初始覆盖

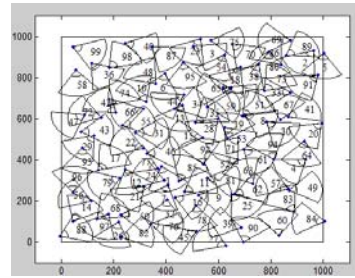
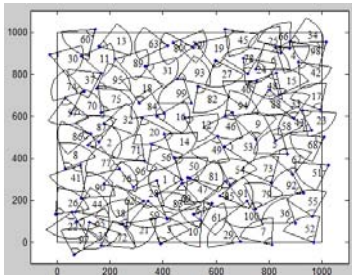
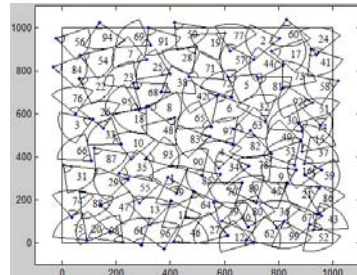


图 4 传统虚拟势场优化覆盖



(a) 混合虚拟势场 50 次迭代优化覆盖



(b) 混合虚拟势场 100 次迭代优化覆盖

图 5

图 5(a)显示的是使用混合虚拟势场迭代 50 次的覆盖效果,从图中可以看出已经具有比传统虚拟势场更好的覆盖效果,而图 5(b)中节点分布更加均匀,盲区 and 重叠区更少.可以说明混合虚拟势场算法在 50 次迭代之后依然还在搜索最优位置,没有陷入局部极小,可以看出改进的算法拥有更好的优化效果和全局搜索能力.

### 3.2 算法效率分析

从图 6 中可以看出,在采用传统虚拟势场进行覆盖优化时,算法在迭代 40 次左右,覆盖率开始在小范围内震荡,而大体基本趋于稳定,陷入局部极小情况.而采用混合虚拟势场时算法进行覆盖优化时,则可以在具有较快收敛速度的同时达到理想的覆盖效果,算法在迭代 50 次后,覆盖率仍在缓慢上升,节点仍然继续搜寻最优位置,没有陷入局部极小.说明混合虚拟势场通过引入邻居节点共同覆盖率打破了传统虚拟势场引力与斥力的平衡关系,辅助节点进行感知方向的调整,从而达到更好的区域覆盖效果.图 7、图 8 显示了在不同的节点数目、感知半径的情况下,算法的覆盖率,可以看出改进的算法具有更高的效率.

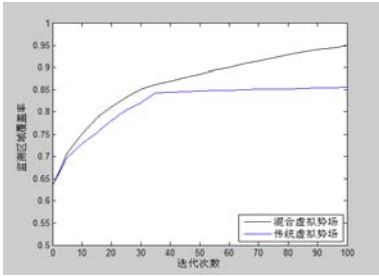


图 6 算法覆盖率对比

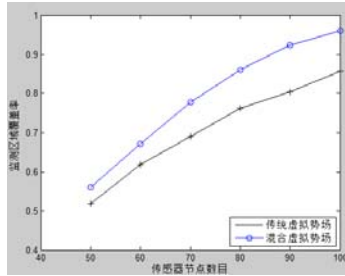


图 7 节点数目对覆盖率的影响

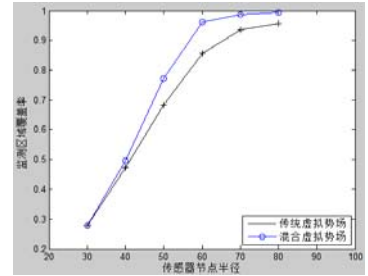


图 8 节点半径对覆盖率的影响

## 4 结 论

本文首先针对 WMSN 的原有模型进行了改进,根据视频图像的可接受清晰度条件提出了扇环模型.基于该模型采用混合虚拟势场对 WMSN 进行覆盖增强研究,针对传统虚拟势场容易陷入局部极小问题通过引入共同覆盖率转换斥力函数,达到打破局部极小平衡的效果.在此基础上增加边界斥力,进一步增强边界节点的有效覆盖率,优化网络的覆盖.通过以上两个步骤对 WMSN 区域覆盖效果进行优化后,从实验结果可以看出,相比传统虚拟势场,从覆盖效果、算法的效率等方面来看,混合虚拟势场对传感器网络的覆盖进行了优化,在覆盖效果以及执行效率方面都有更好的表现.

### References:

- [1] Guvensan MA, Yavuz AG. On coverage issues in directional sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 2011,9:1238–1255.
- [2] Topcuoglu H, Ermis M, Bekmezci I, Sifvan M. A new three-dimensional wireless multimedia sensor network simulation environment for connected coverage problems. *Simulation-Trans. of the Society for Modeling and Simulation Int'l*, 2012,88(1): 110–122.
- [3] Tao D, Ma HD, Liu L. A virtual potential field based coverage-enhancing algorithm for directional sensor networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2007,18(5):1152–1163 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1152.htm> [doi: 10.1360/jos181152]
- [4] Zhao J, Zeng JC. A virtual centripetal force-based coverage-enhancing algorithm for wireless multimedia sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 2010,10(8):1328–1334.
- [5] Xiao F, Wang RC, Ye XG. A path coverage-enhancing algorithm for directional sensor network based on improved potential field. *Journal of Computer Research and Development*, 2009,46(12):2126–2133 (in Chinese with English abstract).
- [6] Ma H, Zhang X, Ming A. A coverage-enhancing method for 3D directional sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM'09)*. 2009,119(10):2791–2795.
- [7] Li X, Frey H, Santoro N. Localized sensor self-deployment with coverage guarantee. In: *Proc. of the ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*. New York: ACM, 2008. 50–52.
- [8] Liu H, Cai ZW, Du JC. Sensor redeployment algorithm based on combined virtual forces in three dimensional space. *ACTA AUTOMATICA SINICA*, 2011,37(6):713–723 (in Chinese with English abstract).

- [9] Almkawi IT, Zapata MG, Al-Karaki JN, Morillo-Pozo J. Wireless multimedia sensor networks: current trends and future directions. *Sensors*, 2010,10:6662-6717.

**附中文参考文献:**

- [3] 陶丹,马华东,刘亮.基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法.软件学报,2007,18(5):1152-1163. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1152.htm> [doi: 10.1360/jos181152]
- [5] 肖甫,王汝传,叶晓国.基于改进势场的有向传感器网络路径覆盖增强算法.计算机研究与发展,2009,46(12):2126-2133.
- [8] 刘惠,柴志杰,杜军朝.基于组合虚拟力的传感器网络三维空间重部署算法研究.自动化学报,2011,37(6):713-723.



王晓晨(1989—),女,黑龙江双鸭山人,硕士生,主要研究领域为无线多媒体传感器网络,区域覆盖算法.

E-mail: tyut\_wxc@163.com



冯晓媛(1979—),女,讲师,主要研究领域为人工智能.

E-mail: peenny@sina.com



冯秀芳(1966—),女,博士,教授,主要研究领域为无线传感器网络,人工智能.

E-mail: feng\_xf@126.com